



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



Artículo: COMEII-19053

*Mazatlán, Sin., del 18 al 20
de septiembre de 2019*

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DRENAJE PARCELARIO SUBTERRÁNEO CONTROLADO

Erickdel Castillo Solis^{1*}; José Rodolfo Namuche Vargas¹; Heber Eleazar Saucedo Rojas²; Carlos Fuentes Ruiz¹

¹Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

erickdel_castillo@tlaloc.imta.mx - 7773293600 ext 128 (*Autor de correspondencia)

²Gerencia de Aguas Subterráneas. Comisión Nacional del Agua. Avenida Insurgentes Sur 2416, Piso 9, Copilco El Bajo, C.P. 04340, Ciudad de México.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y evaluación del funcionamiento de un sistema de drenaje parcelario subterráneo controlado instalado en el Distrito de Temporal Tecnificado 035, Los Naranjos, en el Estado de Veracruz. El sistema de drenaje cubre 6.5 ha y está conformado por seis drenes laterales de 4" de diámetro a una separación de 20 m, con descarga a un colector de 8", tres drenes laterales de 4" de diámetro a una separación de 15 m, con descarga directa a un dren a cielo abierto, los cuales sirvieron para la evaluación hidráulica, cinco drenes laterales de 4" de diámetro a una separación de 30 metros, con descarga a un colector de 8" y cinco drenes laterales de 4" de diámetro a la separación de 40 m, con descarga a un colector de 8". El sistema de drenaje fue evaluado hidráulica y agrónomicamente, al sistema se le adaptó una estructura hidráulica para controlar la profundidad del nivel freático. Como resultado del trabajo se obtuvo lo siguiente: i) El módulo de drenaje para la región y para el cultivo de caña de azúcar fue de $2.4 \text{ ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$; ii) Los espaciamientos que se recomiendan son 15 y 20 metros, para el DTT 035 y para el cultivo de la caña de azúcar; iii) Los rendimientos tienen incrementos ponderados en un rango entre 19 y 71%, con respecto al testigo.

Palabras claves: Trópico húmedo, Distrito de Temporal Tecnificado, Balance Hídrico.



Introducción

Un mal drenaje agrícola puede afectar la cantidad, calidad y oportunidad de la producción agrícola. Los excesos de agua afectan de diversos modos a la producción agrícola, puede generar asfixia de las raíces de los cultivos, propician la aparición de enfermedades generalmente fungosas, contribuyen a la pérdida de nutrientes del suelo y dificultan el acceso a las parcelas de personas y maquinaria. Uno de los factores básicos de la producción agrícola es el manejo del agua en el suelo. Para producir altos rendimientos de los cultivos se requiere que la humedad en la zona de desarrollo de sus raíces permanezca dentro de la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. Es poco común que las condiciones naturales cumplan con estas condiciones, por lo tanto, para incrementar los rendimientos agrícolas se hace necesario el riego, a fin de suplir las deficiencias de agua en épocas secas, y el drenaje agrícola, para remover los excesos que puedan presentarse durante las épocas de lluvia o cuando se tengan pérdidas de agua de riego (Palacios y Landeros, 2000).

El presente trabajo se enfoca en una de las regiones con mayor potencial agrícola, localizada en el sureste del país, en donde las precipitaciones son abundantes y la agricultura tiene condiciones favorables. En este documento se presenta una metodología para diseñar y evaluar un sistema de drenaje parcelario subterráneo controlado para el trópico húmedo.

Materiales y Métodos

Selección de la zona de estudio

La parcela seleccionada para la instalación del sistema de drenaje tiene una superficie de 6.5 ha y pertenece al campo experimental del Ingenio Tres Valles. Esta parcela cuenta con drenes a cielo abierto en donde puede descargar el sistema de drenaje subterráneo, en ella se cultiva la caña de azúcar, la cual ocupa el 93% de la superficie del Distrito de Temporal Tecnificado 035, Los Naranjos, Veracruz.

Balance hídrico y climograma de la zona de proyecto

Existen varios métodos para estimar el balance de agua en el suelo; el utilizado en este trabajo es el propuesto por Thornthwaite y Matter, según el cual se va perdiendo agua para poder generar la evapotranspiración potencial hasta agotar la reserva. También se elaboró el climograma, el criterio utilizado es el de Gaussen, el cual define como mes seco aquel con precipitación (P) menor que el doble de la temperatura (T) promedio mensual.

Determinación de lluvia máxima

Existen varias funciones de distribución que pueden utilizarse en el análisis de lluvia máxima en 24 horas, las utilizadas en el presente trabajo son las funciones; Lognormal, Gumbel I y Gumbel II, para un periodo de retorno de 25 años.



Estimación del escurrimiento

En cuencas que no cuentan con información de aforos de corrientes superficiales para la estimación de la escorrentía total, el método más generalizado, flexible y fácil de aplicar es el del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972). La expresión con la que se calcula el escurrimiento es la siguiente:

$$R_e = \frac{\left(P_p + 5.08 - \frac{508}{CN} \right)^2}{\left(P_p - 20.32 + \frac{2032}{CN} \right)} \quad (1)$$

donde R_e , es el escurrimiento (cm), P_p es la lluvia máxima (cm) y CN es el número de curva (adimensional).

Módulo de drenaje

En forma general se puede expresar como un gasto por unidad de tiempo y área ($l\ s^{-1}\ ha^{-1}$). Es una función de la escorrentía y del tiempo de drenaje.

$$q_0 = \frac{\eta I_p}{T_d} = \frac{\eta(P_p - R_e)}{T_d} \quad (2)$$

donde, q_0 es el módulo de drenaje ($l\ s^{-1}\ ha^{-1}$); I_p es la diferencia de la precipitación máxima diaria P_p (mm) y la escorrentía total R_e (mm), T_d es el tiempo de drenaje (horas) y η es una constante con valor de 2.78.

Elaboración de planos de isobatas e isohypsas.

Se elaboraron los planos de isobatas e isohypsas para realizar el diagnóstico de drenaje en el módulo demostrativo.

Estimación de la conductividad hidráulica a saturación

La conductividad hidráulica a saturación es un indicador de la velocidad con la que el agua se mueve en el suelo. Para su medición se utilizó el método del pozo barrenado, la conductividad hidráulica se calcula mediante la fórmula de Ernst (Ritzema, 1994):

$$K_s = C_k \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3)$$

donde K_s es la conductividad hidráulica a saturación ($m\ día^{-1}$), $\Delta y/\Delta t$ es la velocidad media de recuperación del nivel ($cm\ s^{-1}$) y C_k es el coeficiente que toma en cuenta la geometría del flujo (adimensional). El coeficiente C_k se calcula mediante las fórmulas de Ernst.



Análisis físico del suelo

Los análisis físicos del suelo, consistió en obtener sus curvas granulométricas para la selección del filtro geotextil para el sistema de drenaje agrícola, así como la obtención de la textura, ya que tiene influencia en la mayoría de las otras propiedades del suelo tanto físicas como químicas.

Análisis químico del suelo

El análisis químico se realizó para conocer la conductividad eléctrica, con lo cual se mide indirectamente el contenido de sales disueltas y es un indicador del grado de salinidad del suelo. Se analizó también el pH del suelo, los cationes y aniones.

Análisis químico del agua

Las sales tienen su origen en la disolución o meteorización de rocas y suelos, según el tipo y cantidad de sales disueltas en el agua su calidad puede variar significativamente. La evolución de la calidad de las aguas es de especial interés por el impacto negativo que tiene un agua de mala calidad sobre la producción de los cultivos y la calidad de los suelos. Siguiendo los procedimientos convencionales se tomaron muestras de agua del manto freático y del agua de riego para su posterior análisis químico en laboratorio de directrices como la conductividad eléctrica, cationes y aniones, relación de adsorción de sodio, concentración de elementos tóxicos y dureza total.

Diseño del sistema de drenaje

Tiempo de drenaje

Se define como el tiempo que un cultivo puede tolerar bajo condiciones de inundación sin disminuir significativamente su rendimiento. El tiempo de drenaje es función del tipo de cultivo, cobertura, tipo de suelo, profundidad de raíces, intensidad y duración de la precipitación.

Separación entre drenes

Las condiciones de régimen transitorio permiten obtener el espaciamiento entre drenes como una función del tiempo en que se desea el abatimiento del manto freático, desde una posición inmediatamente después de la incidencia de una lluvia copiosa o del riego, hasta la profundidad deseada antes de que se presente otro evento de drenaje.

La fórmula más utilizada en este caso es la de Glover-Dumm (Ritzema, 1994):

$$L = \pi \sqrt{\frac{K_s d_e}{\mu \alpha}} \quad (4)$$



donde L es la separación entre drenes (m), K_s la conductividad hidráulica a saturación ($m\ día^{-1}$), d_e es el espesor saturado equivalente (m), μ es la porosidad drenable ($m^3\ m^{-3}$) y α es un factor de reacción ($día^{-1}$), que se calcula con la expresión siguiente:

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(1.16 \frac{h_o}{h_t} \right) \quad (5)$$

donde t es el tiempo en el cual debe abatirse el nivel del manto freático (días), h_o es la elevación del nivel freático con respecto al nivel del agua de los drenes inmediatamente después del riego o lluvia, es decir, la posición inicial del manto freático (m) y h_t es la elevación del nivel freático con respecto al nivel del agua en los drenes después de t días de haberse aplicado el riego o presentado la lluvia (m).

La porosidad drenable (μ) puede estimarse con el valor de la conductividad hidráulica a saturación con la siguiente expresión:

$$\mu = \left(\frac{K_s}{100} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

donde K_s es la conductividad hidráulica a saturación ($m\ día^{-1}$).

Cálculos hidráulicos

Los cálculos hidráulicos consisten en: i) estimar el gasto que debe ser removido por drenes y colectores, ii) verificar que la capacidad de conducción con las pendientes y diámetros propuestos, sea suficiente para desalojar los gastos que deben ser removidos y iii) verificar que la velocidad del agua en sitios críticos sea superior a $0.2\ ms^{-1}$ para evitar el riesgo de azolvamiento.

El gasto que debe remover un dren (Q_r) en cualquier sección de su desarrollo es:

$$Q_r = q_o A_d \quad (7)$$

donde q_o es el gasto por unidad de superficie drenado o módulo de drenaje ($l\ s^{-1}ha^{-1}$) y A_d es el área drenada (ha).

La capacidad de conducción (Q_c) de las tuberías utilizadas se calcula con fórmulas de la hidráulica, en función del diámetro, rugosidad y pendiente (Ritzema, 1994):

$$Q_c = 22d^{2.667}s^{0.5} \quad (8)$$

donde d es el diámetro del tubo (m) y s la pendiente de la tubería ($m\ m^{-1}$). Esta expresión es válida para tubos corrugados.



La velocidad de escurrimiento (v) se calcula con la siguiente fórmula (Ritzema, 1994):

$$v = 28 d^{0.667} s^{0.5} \quad (9)$$

Esta velocidad debe ser superior a 0.2 ms^{-1} para evitar o disminuir los problemas de depósitos de azolves.

Diseño en planta

El diseño en planta consiste en determinar la ubicación, en el plano topográfico de la parcela, de los drenes y colectores, así como de las estructuras auxiliares. Para obtener el plano correspondiente es necesario determinar el espaciamiento, dirección y longitud de los drenes.

Diseño en perfil

El diseño en perfil consistió en lo siguiente: i) calcular el perfil del terreno a lo largo de la ubicación propuesta para el colector entubado, ii) proponer la ubicación del colector en el perfil calculado, procurando que la pendiente sea cuando menos de 0.001 mm^{-1} y que las aguas puedan descargar libremente en el colector abierto, iii) calcular los perfiles del terreno en la ubicación de cada dren lateral que descargue en el colector analizado y trazar en dichos perfiles los drenes correspondientes. Este último trazo se realiza a partir del punto de descarga y considerando la pendiente de diseño.

Estructura de control del manto freático

Las estructuras de control del manto freático permitirán efectuar el manejo del agua para propiciar el balance del régimen hídrico del suelo. Se construyó una estructura de control en cada colector de la red de drenaje.

Instalación del sistema de drenaje

La construcción comprende el trazo en campo y la instalación del sistema de drenaje, para ello se aplican las especificaciones técnicas que maneja el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Antes de proceder a la instalación del sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado se debe verificar el estado de conservación de los drenes principales para que el sistema funcione eficientemente.

Evaluación del funcionamiento del sistema de drenaje

La evaluación de un sistema de drenaje agrícola parcelario tiene como finalidad verificar la selección del espaciamiento entre los drenes, analizando el funcionamiento hidráulico del sistema y el comportamiento del cultivo.

Evaluación hidráulica

Para la evaluación hidráulica debe disponerse de mediciones de gastos de descarga del sistema de drenaje y de la posición del manto freático, que permitan estimar el módulo de drenaje y la porosidad drenable.

Evaluación agronómica

La respuesta que se obtenga en el incremento del rendimiento de los cultivos, como resultado de la instalación del sistema de drenaje es el factor que más interesa al agricultor. Esta misma respuesta es el mejor indicador del funcionamiento del sistema de drenaje, siempre y cuando se hallan atendido correctamente otros aspectos del proceso productivo como: la aplicación de fertilizantes, el control de plagas y enfermedades, entre otros.

Resultados y Discusión

Balance hídrico en la zona de proyecto

Según el balance hídrico realizado para la estación de Ciudad Alemán, y Casamaloapan, Veracruz., el cual es mostrado en la figura 2a y en el cuadro 1, en general se presenta un período de déficit de humedad en el suelo, para los meses de marzo a mayo, y un período de exceso de humedad para los meses de junio a noviembre.

Con base en la información climatológica de la estación Ciudad Alemán, Veracruz, se elaboró su climograma, en donde se puede observar que los meses de diciembre a abril son los meses más secos, es decir, hay un déficit de humedad en el suelo y de junio a octubre son los meses que se presentan excesos o inundaciones. En los meses de mayo y noviembre se presentan las reservas de humedad en el suelo (Figura 2b).

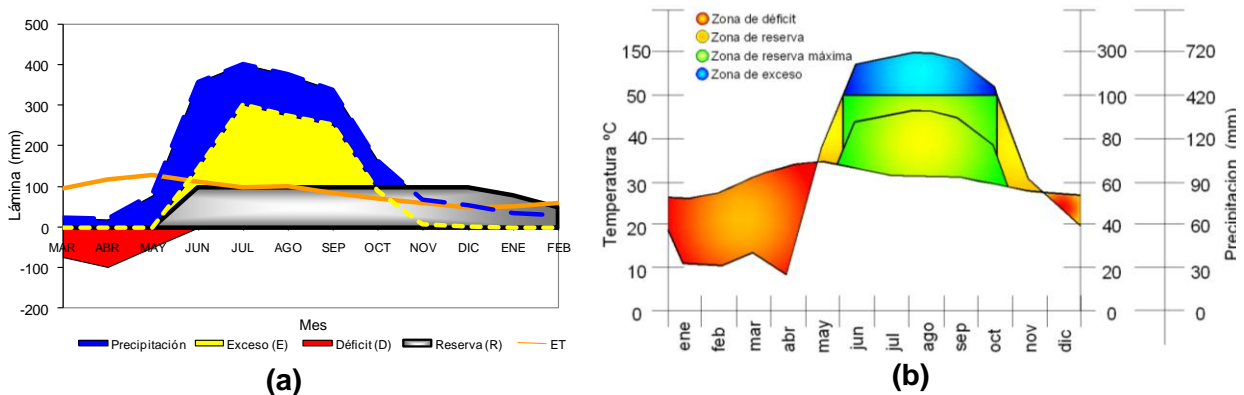


Figura 2. Balance hídrico (a) y climograma (b) de la estación Cd. Alemán, Ver.

Cuadro 1. Balance hídrico de la estación Casamaloapan, Ver.

| Lámina (mm) | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | TOTAL |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| Precipitación | 24.1 | 20.5 | 80.4 | 359.8 | 403.7 | 377 | 340 | 165 | 68.8 | 53.3 | 33.4 | 30.2 | 1956.3 |
| ET | 97.7 | 119.2 | 129.2 | 113.4 | 100.4 | 102 | 86.7 | 73.1 | 60.3 | 50.18 | 53.1 | 60 | 1044.8 |
| P-ET | -73.6 | -98.7 | -48.8 | 246.4 | 303.3 | 276 | 253 | 92 | 8.5 | 3.125 | -19.7 | -29.8 | 911.55 |
| Reserva (R) | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 80.3 | 50.5 | 830.8 |
| VR | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -50.5 | 49.5 |
| ETR | 24.1 | 20.5 | 80.4 | 113.4 | 100.4 | 102 | 86.7 | 73.1 | 60.3 | 50.18 | 0 | 74.6 | 785.28 |
| Exceso (E) | 0 | 0 | 0 | 146.4 | 303.3 | 276 | 253 | 92 | 8.5 | 3.125 | 0 | 0 | 1082 |
| Déficit (D) | -73.6 | -98.7 | -48.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -221 |

Determinación de lluvia máxima

Con una serie histórica de 52 años (1952-2003) de datos de lluvia diaria de la estación Cd. Alemán, Veracruz, y utilizando el programa AX (CENAPRED, 1997), se ajustaron los datos de precipitación a las funciones de probabilidad, obteniendo la función Gumbel II el menor error estándar. En el cuadro 2 se muestran las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno. En la figura 3 se muestran las precipitaciones máximas observadas y las funciones ajustadas.

Cuadro 2. Precipitaciones máximas estimadas para las distintas distribuciones

| Tr (años) | LogNormal | Gumbel I | Gumbel II |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 154.1 | 152.5 | 157.7 |
| 10 | 173.1 | 172.6 | 180.4 |
| 25 | 196.1 | 198.1 | 202.4 |
| 50 | 212.6 | 217.1 | 217.4 |
| 100 | 228.6 | 235.9 | 231.9 |

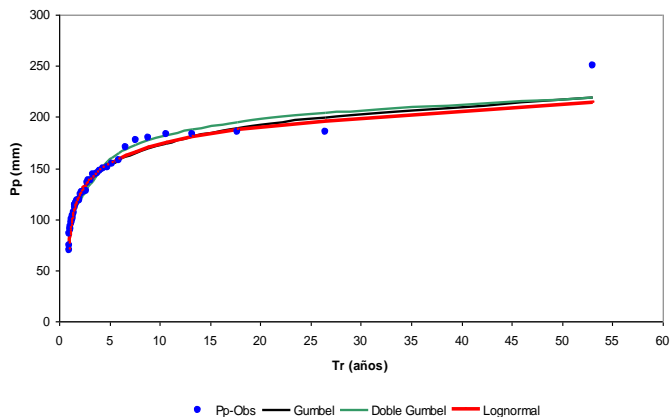


Figura 2. Ajuste de las distribuciones Gumbel I, Gumbel II y LogNormal, a los datos de lluvia máxima en 24 horas

Estimación del escurrimiento

Aplicando el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972) y utilizando la ecuación (1) se estimó el escurrimiento superficial tomando en cuenta que el cultivo es caña de azúcar, sembrada en surcos y que la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años es de 20.24 cm, el número de curva igual a 79. El escurrimiento resultante es de 13.92 cm.

Módulo de drenaje

El módulo de drenaje estimado con la ecuación 2 y para el área de estudio con una $P_p = 202.4$ mm, y $T_d = 72$ horas, resulta de $q_0 = 2.44$ l s⁻¹ ha⁻¹.

Elaboración de planos de isobatas e isohypsas.

El plano de isobatas muestra la profundidad del manto freático (Figura 4) y el plano de isohypsas la dirección del flujo (Figura 5). Se observa que los niveles freáticos en más de la mitad de la extensión de la parcela están por debajo del metro de profundidad, lo que indica que los niveles del agua pueden afectar al desarrollo del cultivo.

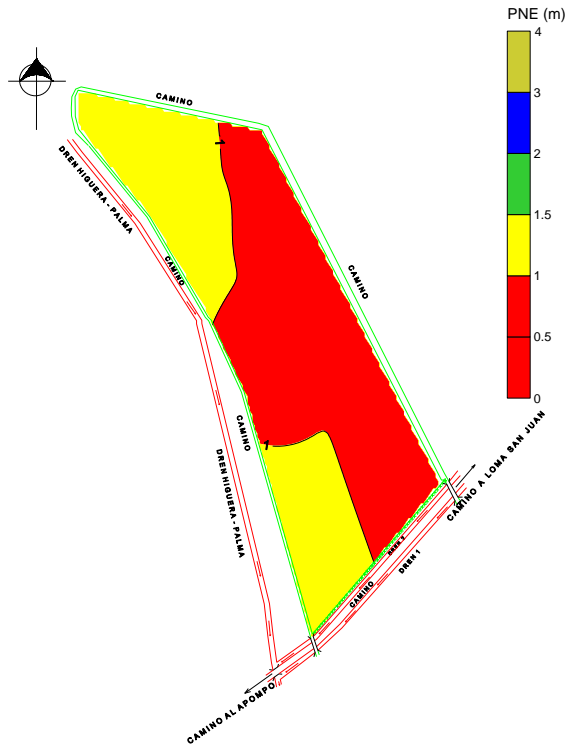


Figura 4. Isobatas del módulo de drenaje subterráneo controlado.

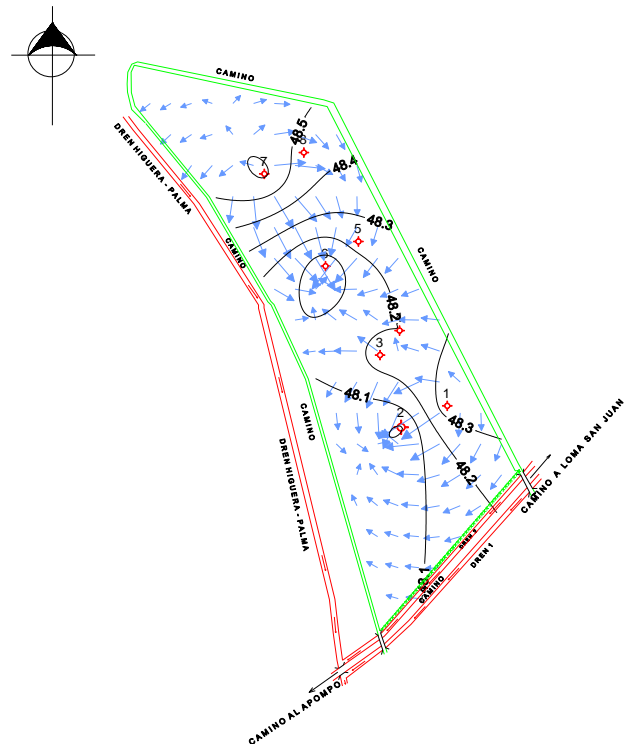


Figura 5. Isohypsas del módulo de drenaje subterráneo controlado.

Construcción de pozos de observación

La fluctuación del manto freático se estudió mediante la construcción de 36 pozos de observación, con la finalidad de monitorear el comportamiento del manto freático tanto en los periodos de lluvia como durante el tiempo que pueda mantenerse la humedad aprovechable para el cultivo. El diámetro de los pozos es de 5 cm (2 pulgadas) y la profundidad máxima es de 2 metros.

Estimación de la conductividad hidráulica a saturación

El valor medio de la conductividad hidráulica a saturación (K_s) fue de 0.33 m día^{-1} .

Análisis físicos del suelo

Se obtuvo la curva granulométrica, con la cual se realizó la selección del filtro geotextil para el sistema de drenaje agrícola. Se utilizó la curva granulométrica del suelo de la



parcela demostrativa para determinar $d_{90} = 500 \mu\text{m}$, el filtro geotextil corresponde a un filtro con aberturas de $600 \mu\text{m}$. Las texturas predominantes del suelo de 0 a 100 cm de profundidad son franco limoso y franco.

Análisis químicos del suelo

La conductividad eléctrica de los suelos varía de 0.25 a 0.64 dS m^{-1} , con un valor medio de 0.46 dS m^{-1} y una desviación estándar de 0.15 dS m^{-1} . Con base en la clasificación de la salinidad del suelo, los resultados muestran que el suelo no presenta problemas de salinidad. En el módulo demostrativo de drenaje el pH de los suelos varía de 7.6 a 9.0, con un valor medio de 8.3. El suelo no presenta problemas de acidez y en cuanto a la alcalinidad varía entre ligera a moderada.

El calcio intercambiable del suelo en el módulo demostrativo de drenaje varía de 2,313 a $10,878.2 \text{ mg kg}^{-1}$, con un valor medio de $4,040.2 \text{ mg Kg}^{-1}$, en consecuencia el suelo es clasificado como muy rico en cuanto a calcio. El magnesio varía de 65.3 a 291.2 mg kg^{-1} , con un valor medio de 147.1 mg Kg^{-1} , es decir el suelo se clasifica como muy rico en contenido de magnesio. El contenido de hierro intercambiable varía de 4.0 a 180.0 mg kg^{-1} , con un valor medio de 32.5 mg kg^{-1} , en consecuencia el contenido de hierro en la parcela demostrativa es de bajo a muy alto. El contenido de manganeso intercambiable varía de 1.0 a 9.8 mg kg^{-1} , con un valor medio de 4.1 mg kg^{-1} , es decir, el contenido de manganeso en el suelo es muy bajo.

Análisis químico del agua

Los resultados del análisis químico de las aguas del manto freático permiten clasificar el agua predominantemente como no salina. Las sales con mayor probabilidad de formación en el agua freática para las dos fosas son Cloruro Cálcica (CaCl), y para el agua de riego es Sulfato Cálcica (Ca_2SO_4). El RAS estimado para el agua del manto freático y para el agua de riego no presenta restricciones para su uso como agua de riego. La calidad del agua del manto freático es aceptable y sin ninguna restricción en general.

Diseño del sistema de drenaje

Separación entre drenes

Para la parcela demostrativa con la conductividad hidráulica a saturación estimada por el método del pozo barrenado y aplicando la ecuación 6 se encontraron los valores de la porosidad drenable. El tiempo de abatimiento del manto freático para los cuatro separaciones entre drenes calculados se muestra en el cuadro 3. Se debe mencionar que el abatimiento del manto freático esperado por los sistemas de drenaje es de 30 cm con respecto a la superficie del terreno.

Cuadro 3. Tiempo de abatimiento del manto freático en función del espaciamiento.

| L (m) | K _s (m/día) | d _e | μ | h _o (m) | H _t (m) | T (días) |
|-------|------------------------|----------------|-------|--------------------|--------------------|----------|
| 15 | 0.27 | 1.62 | 0.038 | 1.0 | 0.7 | 1.78 |
| 20 | 0.15 | 1.63 | 0.052 | 1.0 | 0.7 | 2.45 |
| 30 | 0.39 | 2.24 | 0.062 | 1.0 | 0.7 | 3.29 |
| 40 | 0.53 | 2.84 | 0.073 | 1.0 | 0.7 | 3.50 |

Cálculos hidráulicos

En los cuadros 4 y 5 se muestran los gastos que se requiere evacuar por colector y por drenes, respectivamente.

Cuadro 4. Gasto a evacuar por colector.

| Colector /dren | Área drenada (ha) | Módulo de drenaje (m ³ /s/ha) | Gasto a evacuar (m ³ /s) |
|----------------|-------------------|--|-------------------------------------|
| A | 1.4100 | 0.00244 | 0.00344 |
| B | 0.2000 | 0.00244 | 0.00049 |
| C | 0.1900 | 0.00244 | 0.00046 |
| D | 0.1900 | 0.00244 | 0.00046 |
| E | 1.7100 | 0.00244 | 0.00417 |
| F | 1.5500 | 0.00244 | 0.00378 |

Cuadro 5. Gasto a evacuar por dren.

| Dren | Área drenada (ha) | Módulo de drenaje (m ³ /s/ha) | Gasto a evacuar (m ³ /s) |
|------|-------------------|--|-------------------------------------|
| A1 | 0.1300 | 0.00244 | 0.00032 |
| A3 | 0.2100 | 0.0024 | 0.00050 |
| A5 | 0.2800 | 0.0024 | 0.00067 |
| A7 | 0.2800 | 0.0024 | 0.00067 |
| A9 | 0.2800 | 0.0024 | 0.00067 |
| A11 | 0.2300 | 0.0024 | 0.00055 |
| E1 | 0.3400 | 0.0024 | 0.00082 |
| E3 | 0.3400 | 0.0024 | 0.00082 |
| E5 | 0.3300 | 0.0024 | 0.00079 |
| E7 | 0.3200 | 0.0024 | 0.00077 |
| E9 | 0.3300 | 0.0024 | 0.00079 |
| F1 | 0.4600 | 0.0024 | 0.00110 |
| F3 | 0.4500 | 0.0024 | 0.00108 |
| F5 | 0.4200 | 0.0024 | 0.00101 |
| F7 | 0.1700 | 0.0024 | 0.00041 |
| F9 | 0.0500 | 0.0024 | 0.00012 |

En el cuadro 7 se muestran los gastos de diseño para los colectores y los drenes. El diámetro propuesto para la tubería se acepta dado que se cumple la condición $Q_C \geq Q_r$.

Cuadro 7. Gasto de diseño para colectores y drenes laterales.

| | Diámetro (m) | Pendiente (m/m) | Gasto calculado (m ³ /s) | Velocidad (m/s) |
|----------|--------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|
| Colector | 0.2032 | 0.00100 | 0.0099 | 0.31 |
| Dren | 0.1016 | 0.00120 | 0.0017 | 0.21 |

Diseño en planta

El diseño del módulo de drenaje subterráneo se muestra en la figura siguiente.

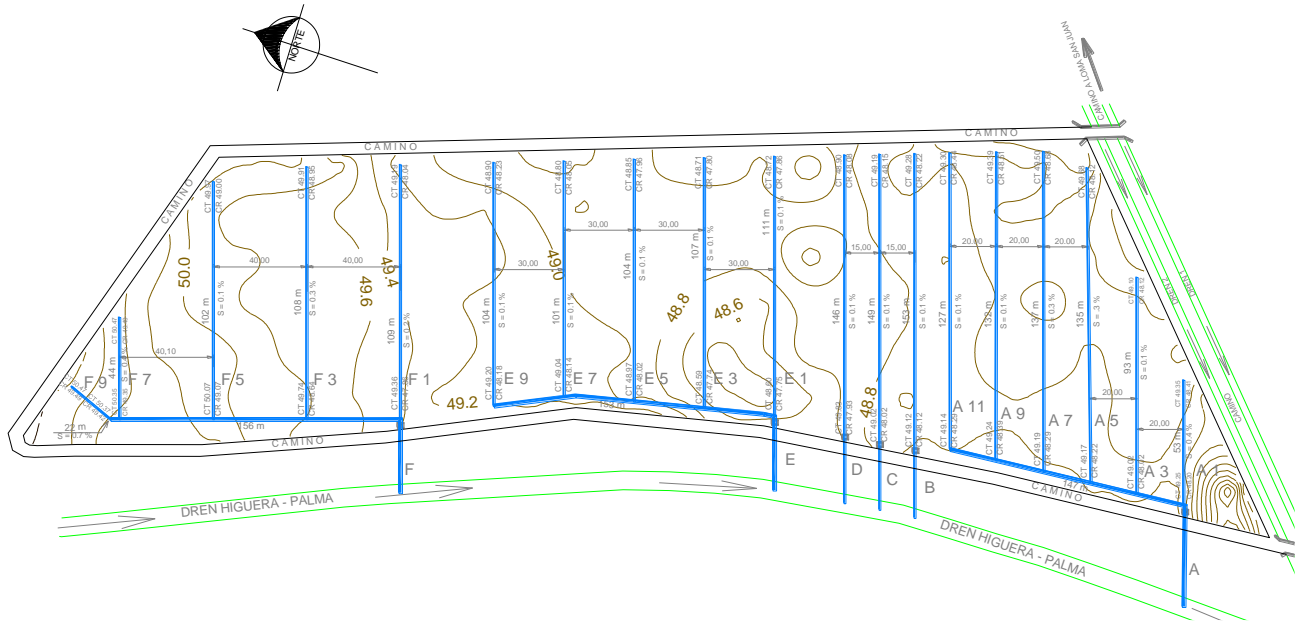


Figura 6. Diseño en planta

Diseño en perfil

Un ejemplo del diseño en perfil se muestra en la figura 7, en ella se observa el perfil del colector A, en donde se indican las cotas del terreno y de la rasante, así como la pendiente del colector.

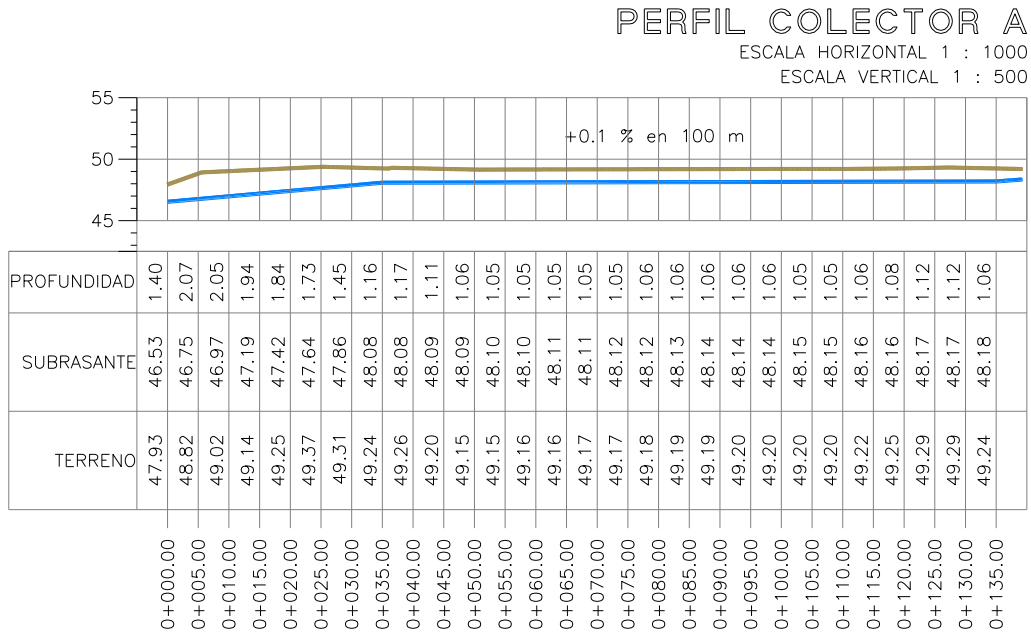


Figura 7. Diseño en perfil

Instalación del sistema de drenaje

La instalación se realizó conforme al plano de diseño, es decir, se instalaron seis drenes laterales de 4" de diámetro a una separación de 20 m con pendiente media de 0.1%, que descargan al colector A de 8" de diámetro con una pendiente de 0.1%; tres drenes laterales B, C y D, de 4" de diámetro a una separación de 15 m con pendiente de 0.1% que descargan directamente al dren a cielo abierto Palma- Higuera los cuales fueron instalados con fines de evaluación hidráulica; cinco drenes laterales de 4" de diámetro a separación de 30 m con pendiente de 0.1%, que descargan al colector E de 8" de diámetro con pendiente de 0.1% y cinco drenes laterales de 4" de diámetro a separación de 40 m con pendiente de 0.1%. Los tres colectores subterráneos A, E y F; así como tres drenes laterales B, C y D descargan al dren a cielo abierto Palma-Higuera. Se utilizaron 2,037 m de tubería de 4" de diámetro ranurada y con filtro geotextil de 400 micras, 456 m de colector de 8" sin ranurar y sin filtro, 19 tapas de 4", 3 tapas de 8", 16 conectores de tubería de 4", 3 rejillas de 8" y 3 rejillas de 4".



Figura 8. Instalación del sistema de drenaje.

Evaluación del funcionamiento del sistema de drenaje

La verificación del funcionamiento hidráulico del sistema de drenaje se realizó con la finalidad de constatar la regulación del régimen de humedad en el perfil del suelo, monitoreado a través de la posición de la superficie freática.

Evaluación hidráulica

De la información recabada en campo, se tiene que, durante el periodo del 10 al 30 de abril el manto freático se mantiene a una profundidad entre 1.0 a 1.6 m, en 24 horas el nivel del manto freático comienza a ascender de 1.2 hasta 0.2 m, posteriormente a partir del día primero de mayo desciende debido al efecto del sistema de drenaje. La lluvia registrada el 30 de abril de 62 mm hace que el manto freático ascienda y al día siguiente el sistema de drenaje permite que el manto freático descienda en algunos casos hasta 50 cm (Figura 9).

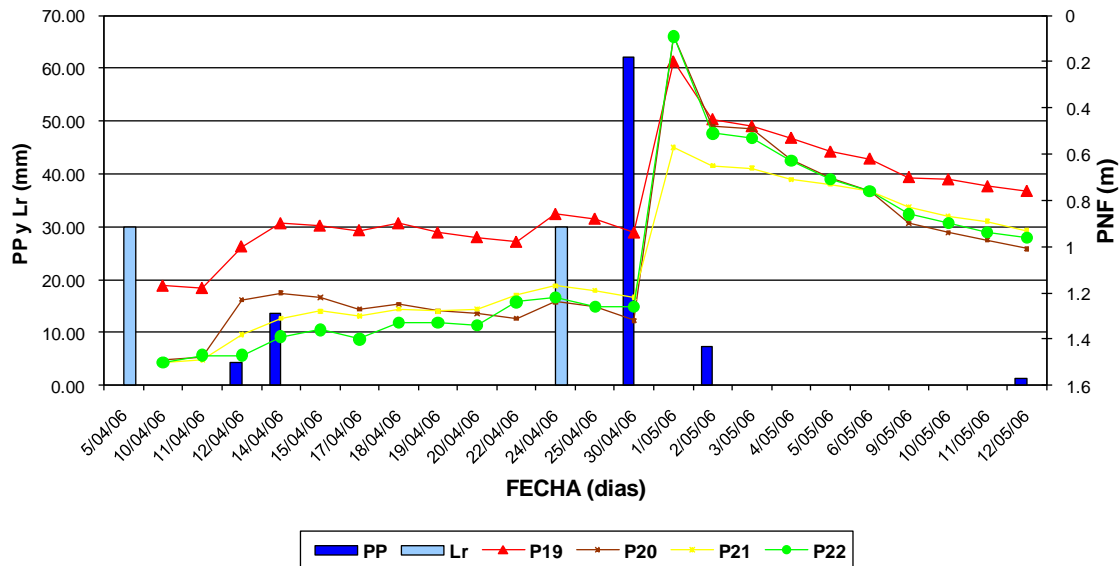


Figura 9. Monitoreo de la posición del manto freático en los pozos 19, 20, 21 y 22.

Evaluación agronómica

Con información del Ingenio Tres Valles y de otros Ingenios con similares características se han calculados los rendimientos, los cuales muestran incrementos ponderados superiores en un rango de entre 19% y 71% con respecto al testigo, identificando rendimientos máximos ponderados de 102 tonha⁻¹año⁻¹ a separaciones entre drenes de 15 m y de 91.35 tonha⁻¹año⁻¹ para los de 20 m.

Conclusiones

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología desarrollada y adaptada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para la instalación de módulos demostrativos de drenaje agrícola controlado. De la aplicación de dicha metodología puede concluirse lo siguiente:

1. El módulo de drenaje para el cultivo de caña de azúcar fue de 2.44 ls⁻¹ha⁻¹. El diseño del módulo demostrativo de drenaje parcelario controlado en el Distrito de Temporal Tecnificado 035, Los Naranjos, Veracruz, permitió definir separaciones entre drenes de 15, 20, 30 y 40 metros.
2. Se diseñaron estructuras, para controlar el manto freático, las cuales tienen como elemento de control una compuerta deslizante.
3. Para monitorear la posición del manto freático se instalaron 36 pozos de observación. A partir del análisis de la evolución en el tiempo de la posición del manto freático en los pozos de observación. La evaluación del funcionamiento del sistema de



drenaje indica que ante la ocurrencia de una lluvia de 62 mm que satura el perfil del suelo, el manto freático desciende 50 cm en 24 horas, como efecto del sistema de drenaje.

4. Los rendimientos tienen incrementos ponderados en un rango de entre 19% y 71% con respecto al testigo, identificando rendimientos máximos ponderados de 102 tonha⁻¹año⁻¹ a separaciones entre drenes de 15 m y de 91.35 ton ha⁻¹año⁻¹ para separaciones de 20 m.

Referencias Bibliográficas

CAMPOS, A. 1987. Procesos del ciclo hidrológico. Editorial Universitaria Potosina. Tomo 2 del volumen 1. Primera reimpresión. S.L.P., México.

CENAPRED. 1997. Programa AX.EXE. Área de riesgos hidrometeorológicos. México, D.F.

DUMM L.D. 1954. Drain spacing formula. Agricultural engineering. Vol 35, pp. 726-730.
FAO. 2008. Aquastat. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm>

IMTA. 1993. Manual de drenaje parcelario de los distritos de riego. Jiutepec, Morelos, México.

IMTA. 2006. ERIC III: Extractor Rápido de Información Climatológica 1920–2000. 1 CD. Comisión Nacional del Agua–Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Jiutepec, Morelos, México.

IMTA. 2009. Guía para la instalación y supervisión de sistemas de drenaje parcelario subterráneo. Jiutepec, Morelos, México.

PALACIOS O Y LANDEROS C. 2000. Drenaje de tierras agrícolas (Material tecnológico). CNA, IMTA, CEDEX, México.

RITZEMA, H.P. 1994. Drainage principles and applications. ILRI Publication 16. Second Edition. Wageningen, The Netherlands.

SOIL CONSERVATION SERVICE. 1972. Drainage of agricultural lands. Water Information Center.

VILLALOBOS, A. 2005. Diseño de drenaje superficial. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.